心理科学进展 2021, Vol. 29, No. 10, 1855–1865
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2021.01855

镜像等效或守恒及其打破：从行为到认知神经机制的研究证据*

齐星亮 [1] 蔡厚德 [2]

([1] 南京晓庄学院幼儿师范学院，南京 211171) ([2] 南京师范大学心理学院，南京 210097)

摘 要 镜像等效或守恒是动物与人类个体对两侧对称自然物体的一种进化自适应加工。但是，这种知觉特性会妨碍包含镜像字符的文字阅读学习。阅读者有必要学会利用镜像泛化抑制的“去学习”机制，打破镜像等效或守恒，以获得识别镜像字符的能力。这一过程中，左侧梭状回皮层通过与早期视觉皮层、顶叶皮层和口语脑网络的交互作用，逐渐发展出一个可以识别镜像字符的视觉词形区(visual word form area, VWFA)。今后的研究需要关注两半球及其连合纤维在镜像等效或守恒加工中的作用、镜像泛化与抑制的详尽加工机制及其对镜像书写的影响、正常汉语儿童的汉字镜像泛化加工等问题。

关键词 镜像等效或守恒及其打破，左侧梭状回，视觉词形区，“去学习”机制，镜像泛化与抑制

分类号 B842.5

1 引言

镜像等效(mirror equivalence)或守恒(mirror invariance)，也称镜像泛化(mirror generlization)或对称性泛化(symmetry generlization)，是个体将视知觉对象的左−右侧面镜像视为同一刺激的一种知觉特性(Corballis, 2018; Dehaene et al., 2015)。早期行为研究表明，镜像等效或守恒是动物与人类个体对自然物体两侧对称性的一种进化自适应加工(Bornstein et al., 1978)。近期的认知神经机制研究发现，镜像等效或守恒会导致正常儿童在包含镜像字符文字的早期阅读学习中出现镜像错误(mirror errors) (Dehaene, Nakamura, et al., 2010)。因此，文字阅读者有必要学会利用镜像泛化抑制的“去学习(unlearning)”机制，打破镜像等效或守恒，以获得识别镜像字符的能力(Dehaene et al., 2015; Dehaene et al., 2005)。而且，发展性阅读障碍儿童(developmental dyslexia, DD)会表现出明显的镜像泛化抑制困难，提示他们的镜像等效或守恒打破机制可能存在异常(Fernandes & Leite, 2017)。可见，探究文字阅读学习中镜像等效或守恒打破的认知神经机制，对阐明文字阅读学习的大脑可塑性具有重要意义(Dehaene et al., 2015; 齐星亮, 蔡厚德, 2019)。为此，本文首先简要论述了镜像等效或守恒的进化自适应理论(evolutionary adaptation theory)及其早期行为研究证据。然后，分别系统梳理近期有关镜像等效或守恒在腹侧视觉通路中的等级加工组织、字母文字阅读学习中镜像等效或守恒打破的认知神经机制和 DD 儿童的镜像泛化抑制困难及其相关脑网络异常的研究证据，以阐明在早期文字阅读学习中左侧梭状回(left fusiform gyrus)或视觉词形区(visual word form area, VWFA)与早期视觉皮层(early visual cortices)、顶叶皮层(parietal cortex)和口语脑网络(brain networks of spoken language)之间的交互作用，可能是学会利用镜像泛化抑制机制打破镜像等效或守恒的重要神经基础。最后展望与探讨一些亟待深入研究的问题。

2 镜像等效或守恒的进化自适应理论

镜像等效或守恒的进化自适应理论认为，一

收稿日期：2020-11-27
* 心理健康与认知科学江苏省重点实验室开放课题(19MHCSKF02)；教育部人文社会科学研究一般项目(19YJCZH128)。
通信作者：蔡厚德, E-mail: caihoude@163.com

个物体的左−右镜像是围绕其垂直轴旋转 180 度后形成的两个侧面像。由于自然界中多数物体的外形是两侧对称的，它们的左−右侧面镜像在知觉上具有类似性或等效性，这便导致个体出现了会将视知觉对象的左−右侧面镜像视为同一刺激的加工特性(Bornstein, et al., 1978; Corballis, 2018; Rollenhagen & Olson, 2000)。支持这一理论的早期证据来自章鱼容易混淆左−右侧面镜像斜线(/ 和 \ )、左−右侧面镜像图(├ 和 ┤)和左−右侧面马蹄形镜像图(⊏ 和 ⊐)的行为实验研究，在随后对鱼类、鸽子、大鼠和猴子等动物的研究中也实证了这一现象(参见，Bornstein, et al., 1978 ; Rollenhagen & Olson, 2000)。而且，人类的一些行为研究也发现，婴儿(3~4 个月)、儿童(3~5 岁)和成人也会像章鱼等动物一样，容易混淆这种侧面镜像斜线和马蹄形镜像图(参见 Bornstein et al., 1978; Corballis, 2018)。因此，镜像等效或守恒反映的是一种视知觉加工的生态适应性，具有系统进化和个体发展的稳定性，可能主要受内置(built-in)认知结构的调节(Bornstein, et al., 1978 ; Rollenhagen & Olson, 2000)。利用镜像等效或守恒加工，个体可以从左−右两个侧面同样迅速地识别天敌、猎物或同伴，这对降低认知学习负荷和减少生存压力都有明显优势(Ahr et al., 2017; Bornstein et al., 1978; Corballis, 2018; Dehaene et al., 2015; Pegado et al., 2011; Rollenhagen & Olson, 2000)。

3 镜像等效或守恒在腹侧视觉通路中的等级加工组织

大脑的腹侧视觉通路(ventral visual pathway)负责形状、物体、面孔和文字等不同范畴刺激的视知觉加工。这条通路来自大脑枕叶 V1 区的视觉信号，经 V2 区和/或 V3 区至 V4 区，然后向颞下皮层(inferotemporal cortex, ITC)传递(Dehaene et al., 2015)。Rodman 等人(1993)对幼年猴 ITC 细胞的电记录研究发现，一些细胞对面孔及其镜像都有反应，提示镜像加工在发育早期是等效的。Rollenhagen 和 Olson (2000)在成年猕猴 ITC 的模式选择细胞中同样记录到一些负责镜像加工的细胞，它们对左−右侧面镜像图比上−下垂直镜像图的反应更相似。Baylis 和 Driver (2001)也发现，猴子 ITC 的形状编码细胞在镜像图和反转对比图之间出现了泛化，但在图形−背景反转图之间并未见到。值得关注的是, Freiwald 和 Tsao (2010)的一项结合功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)和细胞电记录技术的研究发现，成年猕猴 ITC 的面孔镜像系统是按等级加工(hierarchical processing)组织的。具体表现是，面孔反应皮层区的中间外侧部和中间底部的神经元仅对特定观测视角的面孔反应，前外侧部的神经元则对特定观测视角的面孔及其镜像反应，而前内侧部的神经元对几乎任何观测视角的面孔及其镜像都有反应。可见，猴子 ITC 的面孔加工经历了从镜像辨别到特定视角的镜像等效或部分守恒，最后实现完全的镜像守恒。

人类的梭状回(fusiform gyrus)从大脑枕叶延伸至 ITC，在表征物体、面孔和文字等不同范畴的视觉输入信息中起关键作用。Dilks 等人(2011)在一项 fMRI 研究中发现，当人类被试看到按顺序呈现的两个物体图片时，无论这两个物体是相同的还是镜像的，梭状回的物体选择区——后部梭状沟(posterior fusiform sulcus, PFS)的反应都是一样的。然而，处于低加工水平的外侧枕沟(lateral occipital sulcus, LOS)对镜像物体却有敏感的差异反应，表明镜像辨别在早期视觉加工阶段被记录下来了，但随后消失了。Axelrod 和 Yovel (2012)的一项 fMRI 多元模型分析研究也报告了梭状面孔区(fusiform face area, FFA)对面孔左−右侧面镜像的等效性或守恒，但处在低水平视觉加工的枕叶面孔区(occipital face area, OFA)对面孔的左−右镜像则有敏感反应。由此看来，人脑腹侧视觉通路中也存在一个与灵长动物相似的等级加工组织，即梭状回负责处理物体或面孔左−右侧面镜像的等效或守恒信息，而附近的枕叶皮层则具有辨别左−右侧面镜像的能力。

4 字母文字阅读学习中镜像等效或守恒打破的认知神经机制

根据镜像等效或守恒的进化自适应理论，辨别左−右侧面镜像对动物和人类来说几乎没有什么好处。但是，在人类创造的文化情境中，如人们阅读文字时往往需要辨别左右(Corballis, 2018; Dehaene, 2009)。儿童通常在 3~7 岁会混淆可反转的左−右侧面镜像字母，如“b”和“d”或“p”和“q”，导致他们在文字阅读学习中出现镜像错误，因此镜像等效或守恒可能会妨碍包含镜像字符的文字

识别(Dehaene, Nakamura et al., 2010)。近期研究开始关注字母文字的阅读学习中如何打破镜像等效或守恒, 进而获得文字阅读能力的认知神经机制。以下将从认知机制与神经机制两方面加以梳理与阐述。

4.1　认知机制

对葡萄牙语的成人阅读者和文盲者的研究(Kolinsky & Fernandes, 2014; Pegado, Comerlato, et al., 2014)表明, 阅读者判断两个左-右侧面镜像物体是否表示同一刺激的反应要明显慢于判断两个形状相同物体的反应, 提示文字阅读能力的获得可能会干扰物体镜像的等效或守恒加工, 但文盲者并没有出现任何的镜像加工损耗(cost)。研究者(Dehaene et al., 2005; Dehaene, Nakamura et al., 2010)推测, 字母文字的阅读学习也许会伴随镜像等效或守恒的"去学习", 导致镜像等效或守恒的打破。

研究证据表明, 字母文字阅读学习中的镜像等效或守恒的"去学习"机制可能与阅读者对可反转左-右侧面镜像字母的镜像泛化抑制有关。Perea 等人(2011)采用西班牙语单词的词汇判断掩蔽启动范式对四年级儿童和大学生的研究发现, 字母文字阅读的认知系统可能会主动抑制词中出现的可反转字母(b/d)的镜像, 并不抑制不可反转字母(c, r, s, z)的镜像。Brault-Foisy 等人(2017)采用假词负启动范式对 4~5 年级的法语阅读儿童的研究也发现, 如果前面呈现的启动刺激是包含可反转左-右侧面镜像字母(b/d)的假词, 相对于启动刺激是包含不同字母(f 或 t)的不同假词或不同目标字母(f 或 k)的不同假词, 儿童对随后呈现的两个互为侧面镜像探测动物的判断时间会变长。研究者推测, 这种负启动效应反映了在激活探测动物时存在一定的认知损耗, 提示对启动假词中镜像字母的识别和语音解码过程(词素-音素转换)需要进行泛化抑制(Brault-Foisy et al., 2017)。

以上发现得到了采用字母负启动范式研究证据的支持。例如, Borst 等人(2015)在一项检查熟练西班牙语成人阅读者的研究中发现, 与启动刺激为两个非镜像字母(如"a/h")相比, 如果启动刺激为两个侧面镜像字母(如"b/d"), 被试对随后出现的两个侧面镜像探测动物(不是房子)的反应要慢。再如, Ahr 等人(2017)采用相同的范式比较熟练法语成人阅读者辨别两个侧面镜像字母(如 p/q)和两个垂直镜像字母(如 p/b)的负启动效应时发现, 辨别侧面镜像字母比垂直镜像字母需要更强的镜像泛化抑制。另外, Ahr 等人(2016)采用这一范式检查初学西班牙语阅读的一、三、五年级(7~11 岁)儿童的研究还发现, 三组儿童的这种负启动效应的幅度并不因年级(年龄)的不同而改变。这表明不仅成人阅读者并未完全实现对镜像字母泛化的"去学习", 学龄儿童的这种抑制能力也不受阅读熟练水平的影响。

可见, 字母文字阅读者有必要学会利用镜像泛化抑制的"去学习"机制, 以克服镜像字母(b/d, p/q)识别的等效或守恒。但是, 不管是初学阅读的儿童, 还是阅读熟练的成人, 镜像泛化加工都会持续干扰可反转字符的识别, 因此镜像泛化抑制可能总是伴随着包含镜像字符的文字阅读过程。而且, 这种抑制加工也可能在一定程度上干扰物体或动物的镜像等效或守恒。

4.2　神经机制

人类使用文字的历史只有 3~5 千年(Carreiras et al., 2009), 因此还不太可能进化与发展出一个专门用于识别文字的脑区(Dehaene, et al., 2015)。Dehaene 和 Cohen (2011)提出的神经元再利用假设(neuronal recycling hypothesis)认为, 文字阅读学习可能征用了腹侧视觉通路中原先用于识别物体或面孔的梭状回皮层神经元, 将其重新用于识别书面文字。由于梭状回对物体和面孔的加工是镜像等效或守恒的, 因此文字阅读者就有必要学会利用镜像泛化的抑制机制, 打破这一脑区对镜像字符的等效或守恒加工。

研究证据显示, 人类的左侧梭状回中部出现了一个可以识别文字的 VWFA (Dehaene et al., 2015)。Dehaene 和 Nakamura 等人(2010)采用范畴启动任务的 fMRI 研究表明, 熟练的法语成人阅读者在知觉按顺序呈现的相同物体、面孔或法语词时, VWFA 出现了启动效应, 提示这一脑区对这些不同范畴的刺激都有反应。但是, 在知觉按顺序呈现的物体或面孔镜像图时, 靠近 VWFA 的皮层区出现了启动效应, 且左右半球是相似的, 表明这一脑区不仅对物体和面孔的镜像加工是等效或守恒的, 且未出现功能不对称性。但是, 在知觉顺序呈现的镜像词时 VWFA 并没有出现启动效应, 尽管这一脑区与物体或面孔镜像等效或守恒加工的脑区有部分重叠, 提示 VWFA 可以辨别镜像

词。Pegado 等人(2011)采用 fMRI 的研究还发现, 镜像字母并没有像复杂性匹配的物体镜像图那样, 在熟练的法语阅读者的 VWFA 引起启动效应, 提示这一脑区可以辨别镜像字母, 但对物体的加工却是镜像等效或守恒的。这些证据表明, 伴随字母文字的阅读学习, 原先加工物体或面孔的左侧梭状回皮层被重新用于识别字母或词, 而这里的神经元就逐渐习得了辨别镜像字符的能力。

那么, 人脑究竟如何学会通过镜像泛化抑制的“去学习”机制, 打破左侧梭状回皮层神经元对镜像字符的等效或守恒加工, 从而建立具有左侧优势的 VWFA 呢? 尽管目前还缺乏对这一机制的系统研究, 但一些证据提示左侧梭状回或 VWFA 与相关脑网络的相互作用可能起关键作用。研究(Dehaene, Pegado, et al., 2010; Pegado, Nakamura, et al., 2014)表明, 文字阅读学习除了导致 VWFA 产生对字母和字母串的特异性反应之外, 还增强了早期视觉皮层的加工能力。而且, 左颞平台(planum temporale, PT) (存储口语元音和辅音表征)的语音反应和包括左侧额下回、颞叶中上部和顶叶后部皮层在内的口语脑网络对书面句子的反应也都得到增强(Dehaene, Pegado, et al., 2010; Pegado, Nakamura, et al., 2014; Dehaene & Dehaene-Lambertz, 2016)。近期, Moulton 等人(2019)采用弥散张量成像技术(diffuse tension imaging, DTI)的研究发现, 儿童在法语阅读学习的第一年就出现了伴随阅读水平提高的 VWFA 与背侧后部顶叶皮层(dorsal posterior parietal cortex)连接性的特异性改变, 并且与连接纤维束的髓鞘化特异性相关。重要的是, 顶叶皮层可能是参与镜像字母分离的一个重要脑区(Moulton et al., 2019; Priftis et al., 2003)。López-Barroso 等人(2020)的 fMRI 研究还发现, 法语熟练阅读者与文盲者相比, VWFA 与负责语音加工的左额-顶网络(left fronto-parietal network)的连接性明显增强, 但与听觉网络(初级听觉皮层和 Heschl’s 回)和外侧视觉网络(面孔或物体等效或守恒加工的梭状回区域)的连接性明显减弱。而且, VWFA 与额-顶网络的连接性改变依赖文字阅读熟练度的提高(López-Barroso et al., 2020)。

基于以上证据可以初步推测, 在包含镜像字符的文字阅读学习中, 首先需要对那些左-右侧面镜像混淆的字母进行视觉识别、分离和选择(Dehaene, Nakamura, et al., 2010; Moulton et al., 2019), 然后对目标字母或词素进行语音编码(Lachmann, 2002)。前一过程主要包含两种加工: 一是登记与表征图像左-右方向信息的早期视觉皮层与左侧梭状回皮层或 VWFA 的相互作用, 完成镜像字母识别学习中材料驱动的(自下而上的)加工; 另一是负责视觉空间表征和注意定向加工的顶叶皮层与左侧梭状回皮层或 VWFA 的相互作用, 实现目标字母分离与选择中注意驱动的(自上而下的)加工。后一过程则涉及左侧梭状回皮层或 VWFA 与口语脑网络的相互作用, 包括与左侧颞上回皮层(如 PT)的语音分析输出信号的交互以实现字母的语音通达, 以及与颞叶中上部皮层、额下皮层和后部顶叶皮层的交互(左侧弓状束颞-顶部分和胼胝体后部也参与其中), 以实现词素-音素(grapheme-phoneme)的转换。前一过程是镜像泛化抑制和镜像等效或守恒打破的关键, 尤其是顶叶皮层的注意控制加工对镜像字符的分离和目标选择。后一过程属于文字阅读学习的一般性加工, 但给予镜像字母特定的语音标识, 会有助于完成词素-音素转换加工(Lachmann & van Leeumen, 2007)。总之, 在文字阅读学习中学会利用镜像泛化抑制打破字符镜像等效或守恒的神经机制, 可能依赖于左侧梭状回或 VWFA 与早期视觉皮层、顶叶皮层和口语脑网络的交互作用。

5 发展性阅读障碍

发展性阅读障碍(DD)是一种持续性的神经生物学紊乱, 并不因动机缺乏、智力低下和缺少学习机会所致(Peterson & Pennington, 2015)。早在 1928 年 Orton 就推测, 镜像反转错误(reversal error) (如 d 与 b, Я 与 R)是 DD 的核心症状。正如 Orton 所预期的那样, DD 儿童到了五年级也难以辨别镜像字母和毫无意义的镜像图形(Lachmann & van Leeuwen, 2007)。Lachmann 和 van Leeuwen (2007)认为, 阅读障碍儿童可能无法抑制镜像泛化, 使他们更容易看到镜像具有相同的基本形状, 因为沿垂直轴旋转或从另一个侧面看, b 和 d 可能就是一样的。近期, Fernandes 和 Leite (2017)从阅读水平、视觉范畴和方向加工三个方面检查了 DD 儿童镜像反转错误发生的认知机制。结果发现, DD 儿童是唯一一组对镜像差异不敏感的被试, 他们在字母和图形加工中都出现了与阅读水平无关的

特异性镜像辨别困难, 提示 DD 儿童在不同范畴的视觉客体加工中都无法自动辨别镜像差异。研究者推测, 由于镜像字符的阅读学习有必要打破镜像等效或守恒, 所以需要自动触发镜像泛化的抑制机制, 这导致 DD 儿童出现了与文字阅读学习相关的镜像泛化抑制困难(Fernandes & Leite, 2017)。

需要指出的是, 现有研究(Richlan et al., 2011; Martin et al., 2016)较多关注了 DD 存在的语音加工和正字法编码缺陷, 以及相关的脑结构与功能障碍。然而, 虽然加工语音和正字法的脑网络都参与了文字阅读的学习过程, 但镜像辨别困难也许才是妨碍文字识别最初的认知加工障碍, 因为有阅读困难的人很可能难以将字母映射到语音上, 因为他们一开始就很难辨别字母(Corballis, 2018)。证据显示, DD 儿童参与镜像泛化抑制和镜像等效或守恒打破的相关脑网络可能存在结构与功能紊乱。首先, DD 儿童的左侧梭状回或 VWFA 不仅存在结构缺陷(Ma et al., 2014; Frye et al., 2010)与功能异常(van der Mark et al., 2009), 早期视觉皮层的加工能力也有不足(Cao et al., 2018; Siok et al., 2009), 这可能会削弱镜像辨别学习中自下而上的加工, 最终损害左侧梭状回或 VWFA 对镜像字符的识别。然后, DD 儿童在视觉目标定向任务中顶内沟(left intraparietal sulcus, LIPS)存在激活异常(Siok et al., 2009), VWFA 与左顶下小叶(left inferior parietal lobe)的连接性也明显减弱(van der Mark et al., 2011), 这可能会引起对镜像目标的注意选择困难, 导致镜像泛化的抑制缺陷。最后, DD 儿童参与语音编码和发音加工的脑网络与左侧梭状回或 VWFA 的功能连接性明显减弱(van der Mark et al., 2011), 这也许会导致在镜像字母或词素识别中出现语音编码或发音困难(Lachmann & van Leeuwen, 2007)。当然, DD 儿童的这些脑网络紊乱是否确实与他们在文字阅读学习中出现的镜像泛化抑制困难存在特异性关联, 还需在镜像字符加工任务中采用脑结构或功能成像技术进行系统检查。另外, 由于 DD 是一种异质性的发育障碍(卫垌圻 等, 2020), 基于镜像泛化抑制困难及其脑网络紊乱得到的相关证据可以在多大程度上解释 DD 的认知神经病理机制, 还有待检验。

6　问题与展望

镜像等效或守恒是动物与人类个体对两侧对称自然物体的一种自适应加工, 但可能会妨碍包含镜像字符的文字阅读学习。因此, 阅读者有必要学会利用镜像泛化抑制的“去学习”机制, 打破镜像等效或守恒, 以获得识别镜像字符的能力。这一过程中, 人脑的左侧梭状回逐渐产生了一个可以识别镜像字符的 VWFA, 但这一脑区对物体或面孔的加工依然是镜像等效或守恒的。这符合神经元再利用假设, 即文字阅读学习征用了先前用于物体或面孔加工的左侧梭状回神经元。初步证据显示, 左侧梭状回或 VWFA 与早期视觉皮层、顶叶皮层和口语脑网络的交互作用, 可能是文字阅读学习中镜像泛化抑制与镜像等效或守恒打破的重要神经基础。而且, DD 儿童的相关脑网络可能存在结构与功能异常, 这也许会导致他们在文字阅读学习中出现镜像泛化的抑制困难。

然而, 尽管镜像等效或守恒及其打破的认知神经机制已初见端倪, 但仍有一些问题亟待深入研究。

第一, 两半球及其连合纤维在镜像等效或守恒加工中的作用。大量证据表明, 图形、物体或动物等的镜像等效或守恒加工是由 ITC 中的同一组神经元进行知觉编码的, 即镜像等效或守恒是由单侧半球表征的。但是, 还有一种理论假设认为, 由于左右半球的结构对称性, 两半球通过连合纤维能够将它们各自皮层的镜像点联系起来, 因此, 镜像等效或守恒也可以通过半球间同位交换建立的镜像记忆环路来实现(Corballis, 2018)。基于这一观点, 每一半球都可以正确感知字母 b, 随后被登记和存储。但这一过程中这些信息会在半球间传输和反转, 即大脑是作为一个整体存储字母 b 和 d 的, 以实现两侧表征与镜像等效或守恒(Corballis, 2018)。一些较早完成的比较鸽子或猴子在切断半球间连合纤维前后进行的一侧半球知觉学习(训练)与另一侧半球记忆测试的实验研究(Achim & Corballis, 1977; Noble, 1966, 1968)提供了部分支持半球间存在镜像记忆反转的证据, 还提示前连合和海马连合的作用可能更大。而且, 人类的镜像书写不仅在左半球受损后比右半球受损后更常见, 用左手也比右手也更频繁(Balfour et al., 2007; Schott, 2007), 提示左手书写也许更倾向于由右半球的反转记忆环路控制。Corballis (2018)推测, 灵长动物的 ITC 及其连合纤维可能在半球间镜像记忆反转中起关键作用。可见, 尽

管这种镜像记忆反转观点得到的直接证据还较少，但一个完整的镜像等效或守恒加工过程有必要包括知觉编码与记忆存储两个阶段。今后的研究可以将知觉编码与记忆存储中的镜像加工分离开来，以便明确前者是否主要在半球内编码和表征，而后者主要通过半球间连合在两半球存储和提取。例如，对灵长动物采用 ITC 细胞的电记录技术和/或半球间连合分离术，不仅可以评估 ITC 细胞对镜像刺激表征的相似性在半球内或半球间的反转偏好相关性(Rajalingham et al., 2020; Rollenhagen & Olson, 2000)是否会在连合纤维分离前后出现改变，也可以分别检查在知觉编码或记忆任务中出现的镜像混淆是否会在连合纤维分离前更易表现，而镜像辨别则会在连合分离后更易实现(Corballis, 2018)。另外，对正常人和割裂脑病人在半视野速示呈现(visual half-field tachistoscopic presentation)镜像刺激条件下进行事件相关电位(event-related potentials, ERPs)记录、fMRI 或 DTI 扫描，还可以系统检查两半球在镜像加工中的时空关系以及半球间连合纤维的连接性与半球镜像反转的关系(Cohen et al., 2000; Adibpour et al., 2017)。

第二，镜像泛化与抑制的详尽加工机制。尽管在包含镜像字符的文字阅读中需要学会利用镜像泛化抑制的“去学习”机制，但熟练成人阅读者的这种“去学习”并不彻底，儿童的阅读经验似乎也不影响镜像泛化抑制的加工效率。因此，镜像泛化与抑制的详尽加工机制，还亟待阐明。例如，镜像泛化与抑制究竟是如何产生与加工的？儿童如何逐渐习得了镜像泛化的抑制能力？如果字母识别对左侧梭状回的再利用会持续受到镜像等效或守恒加工的制约，那么字母的镜像泛化就可能是由这一脑区的固有加工特性所引发的一种启发式的(heuristic)自动加工(Borst e al., 2015)。因此，不管是初学或已学会文字阅读的儿童，还是阅读熟练的成人，文字阅读中的字母镜像泛化加工都会被自动激活。一些 fMRI 研究(Dehaene, Pegado, et al., 2010; Pegado et al., 2011)也发现，阅读熟练成人的 VWFA 不仅会自动产生对物体镜像的等效或守恒加工，也可以自动辨别镜像字母或词，这起码反映了在熟练成人阅读者中镜像泛化与抑制加工都可能是自动发生的。研究者推测，镜像泛化抑制可能是一种在线(on-line)产生的对镜像泛化加工的认知神经控制(Borst et al., 2015)。而且，与作为执行功能(executive function)成分的意向性抑制控制(intentional inhibitory control)明显不同，对镜像泛化的抑制可能并不依赖于前额皮层(prefrontal cortex, PFC)的发育而发展，只需强化训练很快就可实现自动化(Ahr et al., 2016)。尽管这些推测性的解释似乎可以说明一、三、五年级的阅读儿童为什么出现了相似程度的负启动效应(Ahr et al., 2016)，但还缺少从学前儿童到初学阅读儿童的系统跟踪或比较研究的验证。未来的研究可以关注以下一些问题：(1)物体或动物的镜像等效或守恒如何激活了字母或词的镜像泛化加工？(2)怎样的早期阅读经验或镜像泛化信息输入表征会触发镜像泛化抑制的发生？(3)镜像泛化抑制是发生在字母知觉水平还是记忆表征水平？(4)哪些因素会影响自动化镜像泛化抑制习得的时间进程？

另外，工作记忆(working memory)是否参与了镜像泛化抑制的习得过程，也值得探究。由于工作记忆中信息的暂存和加工依赖于 PFC 的参与(Funahashi, 2017)，如果 PFC 在镜像泛化抑制加工中并不重要，那么，工作记忆就可能与镜像泛化抑制的习得无关。但是，Lachmann 和 Leeuwen (2007, 2014)认为，在阅读第一阶段(如前字母阶段)，字母的镜像泛化抑制可能是一种需要工作记忆参与的主动加工，而伴随练习过程这种加工策略才逐步变得自动化。Perea 等人(2011)的词汇启动实验也提示，字母文字阅读的认知系统可能会主动抑制词中出现的可反转字母的镜像。因此，镜像泛化抑制的习得中可能存在一个从需要工作记忆的主动加工逐渐向自动加工转变的过程。今后的研究需要检查工作记忆在早期阅读学习中对镜像泛化抑制加工的影响究竟发生在哪个阶段或环节，如镜像字母的早期视觉辨别、注意选择与监控、语音编码或词素−音素的转换中。

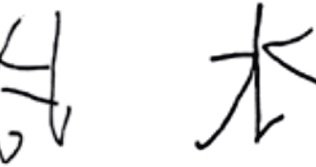
第三，镜像泛化与抑制对镜像书写的影响。Fischer (2011, 2013)选择结构与朝向左−右不对称的数字和大写字母为材料，系统检查了 5~6 岁的字母文字阅读儿童出现镜像书写的认知机制。结果发现，朝左字符(1、2、3、7、9、J 和 Z)出现的反转书写率要高于朝右字符(4、5、6、B、D、E、F、K、L、P 和 R)。有趣的是，当诱导儿童从右向左书写时他们倾向于反转朝右的字符，从左到

右书写时则倾向于反转朝左的字符(Fischer, 2017)。基于神经元再利用假设和镜像等效或守恒加工的等级加工组织, Fischer 和 Luxembourger (2018)认为, 早期视觉皮层可以检测到字符方向, 但这些信息在向记忆转化过程中被镜像泛化加工删除了(或不可通达了), 这使 5 岁左右的儿童能表征字符形状, 但不能表征它们的方向。当要求儿童写一个字符时, 通常会内隐或无意识地参照自身文化中文字的书写方向(从左到右)而即兴创作。可见, 虽然由文化所决定的文字书写方向会在一定程度上制约不同朝向字符的镜像书写偏好, 但字符的镜像泛化依然是导致正常儿童镜像书写的主要原因。近期研究还显示, 儿童在读写能力发展过程中确实会自动获取有关书面语言书写方向(从左到右)的内隐知识, 并容易地泛化到那些类似字母的新奇字符形式(McIntosh, Anderson, et al., 2018)。而且, 正常儿童的发育性镜像书写与字母方向的镜像辨别错误是平行的, 提示镜像书写也与镜像辨别困难密切相关(McIntosh, Hillary, et al., 2018)。

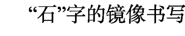
值得关注的是, 正常儿童也需要学会利用镜像泛化抑制来克服镜像书写的发生吗? 字母文字的阅读可能主要涉及可反转镜像字母(如, b/d; p/q)的竞争与干扰, 通过镜像泛化抑制可以实现对目标字符的选择。但是, 镜像书写还涉及大量不可反转的字符, 那些在结构上左−右不对称的字符更易出现镜像书写(Fischer & Luxembourger, 2018)。通过镜像泛化抑制有助于选择正确的字符, 而放弃错误的字符。因此, 阅读中字母的镜像泛化与抑制加工可能会持续存在, 而书写中的字母镜像泛化也许只在儿童初学书写时起作用, 此时镜像泛化抑制加工才需介入。伴随儿童书写的强化训练, 以及他们方向辨别能力和精细运动技能的提高, 儿童的镜像书写会逐渐减少甚至完全消失(Fischer & Luxembourger, 2018)。另外, 阅读学习中字母的镜像泛化抑制可能主要发生在感知表征的选择及其与语音表征的连接中, 而书写学习中的抑制则可能发生在感知−运动记忆表征的存储与提取过程中。未来研究可以利用数码笔记录书写时的空间和运动数据, 以便从拓扑空间运动水平(topokinetic level)和字符形状运动水平(mophorkinetic level)系统检查文化和教育如何制约学前儿童出现方向性镜像书写的机制, 同时评价正常书写和镜像书写的神经运动等价性, 以揭示镜像泛化与抑制加工影响儿童镜像书写的动态变化规律(Portex et al., 2018)。

第四, 正常汉语儿童的汉字镜像泛化加工。汉字作为一种非字母的表意文字, 在笔画、部件或整字层面上均不包含与“b/d”和“p/q”类似的可反转的左−右侧面镜像字符。因此, 正常汉语儿童在汉字阅读学习中可能并不会出现由镜像字符混淆所引起的镜像错误。但是, 近期的一项研究(张丽, 李甦, 2018)发现, 3~5 岁汉语儿童在知觉匹配任务中并未对镜像汉字表现出敏感性, 提示学前儿童在汉字知觉中可能存在镜像泛化现象。重要的是, 这种镜像泛化是否会影响正常儿童早期的汉字阅读学习呢? 一系列研究表明, 学习汉字的幼儿在入学前就表现出一定的文字形态意识。例如, 赵静和李甦(2014)对 3~6 岁儿童汉字字形认知的研究发现, 3~4 岁儿童的汉字字形处于萌芽状态; 5 岁儿童已经能够较好区分汉字与线条图; 6 岁儿童已具备了较好的汉字字形辨别能力。尽管汉语中没有任何两个汉字是互为 180 度垂直轴旋转的左−右镜像, 但汉字中依然存在少量在字形上近似左−右镜像的部件(如, “亻”和“卜”)或整字(如, “手”和“毛”、“和”和“味”)。如果正常汉语儿童在阅读学习的早期存在对它们知觉编码或记忆表征的镜像泛化现象, 就可能引起知觉或记忆的混淆或错误, 进而影响阅读学习的准确性和速度。当然, 这种可能性及其机制还有待进一步实证。

值得重视的是, 一些研究(李心天 等, 1989; 徐震雷, 李心天, 1990; 周统权 等, 2008)还发现, 5~6 岁的正常汉语儿童更易出现汉字的左−右镜像书写, 提示镜像泛化也会影响儿童的汉字书写。陈思(2010)、马娟和季燕(2014)采用系统观察法和作品分析法检查汉语前书写(emergent writing)阶段中儿童镜像书写特点的研究表明, 与 4 岁儿童相比, 5~6 岁汉语儿童出现左−右镜像书写的汉字逐渐增多, 而且, 那些结构上左−右不对称的汉字尤为突出, 这与数字和大写字母中的发现(Fischer & Luxembourger, 2018)是一致的。重要的是, 这些儿童在书写具有斜线特征的笔画时更容易出现左−右镜像混淆(见图 1), 如“月”字中的撇和竖钩中的钩, “水”字中的竖钩中的钩、撇与捺, “石”字中的撇、“小”字中的竖钩中的钩。而且, 点的镜像书写也容易出现左−右混淆, 如“国”字的一点和“头”字









“月”字的镜像书写 “水”字的镜像书写 “国”字的镜像书写 “石”字的镜像书写

“子”字的镜像书写 “好”字的镜像书写 “头”字的镜像书写 “小”字的镜像书写

图 1 笔画镜像书写导致整字镜像书写举例(采自: 陈思, 2010)

中的两点。有趣的是, 这些笔画的镜像书写常导致整字的镜像书写(见图 1)。其实, 这些字中的“撇与捺”在图形和朝向特征上与早期行为研究中采用的互为侧面镜像的斜线刺激(/ 与 \ )类似, 这在动物与人类婴儿以及 3~5 岁儿童中也很难辨别。另外, 在“好”字中不仅出现了整字的左−右部件镜像反转, 左部件“子”字还出现了朝向反转, 即朝左写成了朝右(见图 1)。而且, “子”字中“了”字的图形特征类似于早期行为研究中采用的马蹄形左−右镜像图“ ⊏ 与 ⊐ ”中朝左的刺激, “子”字类似于“ E 与 Ǝ ”中朝左的刺激, 它们的书写中都出现了朝右反转。可见, 正常汉语儿童的镜像书写中出现了与早期行为研究相一致的镜像等效或守恒的图形特征, 这在数字和大写字母的镜像书写中似乎并不明显(Fischer & Luxembourger 2018)。但是, 正常汉语儿童也倾向于将朝左的笔画、部件或整字朝右书写, 这种偏好与数字和大写字母的镜像书写却十分相似。因此, 今后的研究不仅有必要系统检查哪些汉字更容易导致正常汉语儿童出现镜像书写, 以及它们在笔画、部件和整字层面上的图形和朝向特征, 还要探究正常儿童在汉字的早期读写学习中所积累的文字方向性经验如何影响不同特征汉字的镜像书写, 以便为儿童早期的汉字读写教学与镜像错误的诊断与干预提供必要的认知心理学基础。

需要指出的是, 以上对正常汉语儿童在早期读写学习中可能出现的汉字镜像泛化加工的探讨, 也许对汉语阅读障碍的研究有一定的借鉴意义。尽管汉语 DD 儿童的阅读错误也不可能由互为镜像字符的混淆所致, 但是, 如果他们也会像字母文字 DD 儿童那样, 存在镜像泛化的抑制困难(Fernandes & Leite, 2017), 就有可能在辨认或记忆那些字形上近似镜像的汉字部件或整字时出现错误, 进而妨碍汉字的阅读学习。王晓辰等人(2014)的一项研究发现, 在 33 名五年级汉语 DD 儿童中有 22 名存在左−右镜像反转汉字的识别困难, 表明可能有较多比例的汉语 DD 儿童存在汉字识别的镜像泛化, 而正常汉语儿童中这种现象只在初学汉字时出现(张丽, 李甦, 2018)。因此, 汉语 DD 儿童是否会持续存在镜像泛化的抑制困难以及对汉字阅读学习的影响, 还需深入研究。另外, 近期研究开始关注 DD 的阅读障碍与书写缺陷的关系, 发现它们在字形加工阶段都涉及 VWFA。而且, 汉语 DD 儿童的书写缺陷主要表现为书写速度慢、准确性差、字体偏大、变异性更大和笔画错误多(卫垌圻 等, 2020)。今后的研究有必要系统探查汉语 DD 是否存在受镜像泛化抑制困难影响的镜像书写及其与镜像阅读的关系, 以及背后的神经机制。

参考文献

陈思. (2010). *汉语儿童前书写发展研究* (硕士学位论文). 华东师范大学, 上海.

李心天, 徐震雷, 崔耀, 吴任刚, 关东秀, 董京育. (1989). 儿童镜像书写的研究. *心理学报*, (3), 254–260.

马娟, 季燕. (2014). 幼儿自发状态下前书写能力发展状况与教育对策研究. *江苏幼儿教育(课程与教学)*, (2), 67–

71.

齐星亮, 蔡厚德. (2019). 文字阅读学习的大脑可塑性机制. *心理科学*, *42*(5), 1127–1133.

王晓辰, 李清, 邓赐平. (2014). 汉语阅读障碍的语音加工及正字法加工缺陷的实验研究. *心理科学*, *37*(4), 803–808.

卫垌圻, 曹慧, 毕鸿燕, 杨炀. (2020). 发展性阅读障碍书写加工缺陷及其神经机制. *心理科学进展*, *28*(1), 75–84.

徐震雷, 李心天. (1990). 聋哑儿童与正常儿童镜像书写的比较. *心理学报*, (4), 362–367.

张丽, 李甦. (2018). 3~5 岁儿童汉字方向敏感性的发展. *心理与行为研究*, *16*(1), 74–80.

赵静, 李甦. (2014). 3~6 岁儿童汉字字形认知的发展. *心理科学*, *37*(2), 357–362.

周统权, 徐以中, 杨亦鸣. (2008). 正常被试与失语症患者镜像书写的对比研究——镜像书写发生机制新论. *语言科学*, *7*(1), 18–25.

Achim, A., & Corballis, M. C. (1977). Mirror-image equivalence and the anterior commissure. *Neuropsychologia*, *15*(3), 475–478.

Adibpour, P., Dubois, J., & Dehaene-Lambertz, G. (2017). Right but not left hemispheric discrimination of faces in infancy. *Nature Human Behaviour*, *2*, 67–79.

Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157–165.

Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Predominance of lateral over vertical mirror errors in reading: A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain & Cognition, 116*, 1–8.

Axelrod, V., & Yovel, G. (2012). Hierarchical processing of face viewpoint in human visual cortex. *Journal of Neuroscience, 32*(7), 2442–2452.

Balfour, S., Borthwick, S., Cubelli, R., & Sala, S. D. (2007). Mirror writing and reversing single letters in stroke patients and normal elderly. *Journal of Neurology*, *254*, 436–441.

Baylis, G. C., & Driver, J. (2001). Shape-coding in IT cells generalizes over contrast and mirror reversal, but not figure-ground reversal. *Nature Neuroscience*, *4*, 937–942.

Bornstein, M. H., Gross, C. G., & Wolf, J. Z. (1978). Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition, 6*(2), 89–116.

Borst, G., Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The cost of blocking the mirror generalization process in reading: Evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*(1), 228–234. doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9

Brault-Foisy, L. M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d? *Journal of Experimental Child Psychology, 162*, 259–267.

Cao, F., Yan, X., Spray, G. J., Liu, Y. N., & Deng, Y. (2018). Brain mechanisms underlying visuo-orthographic deficits in children with developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, (12), 490. doi: 10.3389/fnhum.2018.00490

Carreiras, M., Seghier, M. L., Baquero, S., Estévez, A., Lozano, A., Devlin, J. T., & Price, C. J. (2009). An anatomical signature for literacy. *Nature*, *461*(7266), 983–986.

Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123*(Pt 2), 291–307.

Corballis, M. C. (2018). Mirror-image equivalence and interhemispheric mirror-image reversal. *Frontiers in Human Neuroscience*, (12), 140. doi: 10.3389/fnhum.2018.00140

Dehaene, S. (2009). *Reading in the brain: The new science of how we read*. New York: Penguin Viking.

Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences, 15*(6), 254–262.

Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(4), 234–244.

Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: A proposal. *Trends in Cognitive Sciences. 9*(7), 335–341.

Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2016). Is the brain prewired for letters? *Nature Neuroscience*, *19*(9), 1192–1193.

Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, *49*(2), 1837–1848.

Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A., ... Cohen, L. (2010). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science, 330*(6009), 1359–1364.

Dilks, D. D., Julian, J. B., Kubilius, J., Spelke, E. S., & Kanwisher, N. (2011). Mirror-image sensitivity and invariance in object and scene processing pathways. *Journal of Neuroscience*, *31*(31), 11305–11312.

Fernandes, T. & Leite, I. (2017). Mirrors are hard to break: A critical review and behavioral evidence on mirror-image processing in developmental dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, *159*, 66–82.

Fischer, J. P. (2011). Mirror writing of digits and (capital) letters in the typically developing child. *Cortex*, *47*(6), 759–762.

Fischer, J. P. (2013). Digit reversal in children's writing: A simple theory and its empirical validation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *115*(2), 356–370.

Fischer, J. P. (2017). Character reversal in children: The prominent role of writing direction. *Reading and Writing*, *30*(3), 523–542.

Fischer, J. P., & Luxembourger, C. (2018). A synoptic and theoretical account of character (digits and capital letters) reversal in writings by typically developing children. *Education Sciences, 8*(3), 137. doi:10.3390/educsci8030137

Freiwald, W. A., & Tsao, D. Y. (2010). Functional compartmentalization and viewpoint generalization within the macaque face-processing system. *Science*, *330*(6005), 845–851.

Frye, R. E., Liederman, J., Malmberg, B., Mclean, J., Strickland, D., & Beauchamp, M. S. (2010). Surface area accounts for the relation of gray matter volume to reading-related skills and history of dyslexia. *Cerebral Cortex*, *20*(11), 2625–2635.

Funahashi, S. (2017). Working Memory in the Prefrontal Cortex. *Brain Sciences*, *7*(5), 49. doi:10.3390/brainsci7050049

Kolinsky, R., & Fernandes, T. (2014). A cultural side effect: Learning to read interferes with identity processing of familiar objects. *Frontiers in Psychology, 5,* 1224. doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01224

Lachmann, T. (2002). Reading disability as a deficit in functional coordination. In E. Witruk, A. D. Friederici, & T. Lachmann (Eds.), *Basic functions of language, reading, and reading disability* (pp. 165–198). Boston: Kluwer Springer.

Lachmann, T., & van Leeuwen, C. (2007). Paradoxical enhancement of letter recognition in developmental dyslexia. *Developmental Neuropsychology*, *31*(1), 61–77.

Lachmann, T., & van Leeuwen, C. (2014). Reading as functional coordination: Not recycling but a novel synthesis. *Frontiers in Psychology*, *5,* 1046. doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01046

López-Barroso, D., de Schotten, M. T., Morais, J., Kolinsky, R., Braga, L. W., Guerreiro-Tauil, A., ... Cohen, L. (2020). Impact of literacy on the functional connectivity of vision and language related networks. *NeuroImage, 213*, 116722. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116722

Ma, Y. Z., Koyama, M. S., Milham, M. P., Castellanos, F. X., Quinn, B. T., Pardoe, H., ... Blackmon, K. (2014). Cortical thickness abnormalities associated with dyslexia, independent of remediation status. *NeuroImage: Clinical, 7*, 177–186.

Martin, A., Kronbichler, M., & Richlan, F. (2016). Dyslexic brain activation abnormalities in deep and shallow orthographies: A meta-analysis of 28 functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping, 37*(7), 2676–2699.

McIntosh, R. D., Anderson, E. L., & Henderson, R. M. (2018). Experimental confirmation of a character-facing bias in literacy development. *Journal of Experimental Child Psychology*, *170*, 207–214.

McIntosh, R. D. Hillary, K., Brennan, A., & Lechowicz, M. (2018). Developmental mirror-writing is paralleled by orientation recognition errors. *Laterality*: *Asymmetries of Brain, Behaviour, and Cognition*, *23*(6), 664–683. doi: 10.1080/1357650X.2018.1445748

Moulton, E., Bouhali, F., Monzalvo, K., Poupon, C., Zhang, H., Dehaene, S., ... Dubois, J. (2019). Connectivity between the visual word form area and the parietal lobe improves after the first year of reading instruction: A longitudinal MRI study in children. *Brain Structure & Function*. *224*(4), 1519–1536.

Noble, J. (1966). Mirror-images and the forebrain commissures of the monkeys. *Nature*, *211*, 1263–1265. doi: 10.1038/2111263a0

Noble, J. (1968). Paradoxical interocular transfer of mirror-image discriminations in the optic chiasm-sectioned monkey. *Brain Research*, *10*(2), 127–151.

Orton, S. T. (1928). Specific reading disability-Strephosymbolia. *Journal of the American Medical Association*, *13*, 9–17.

Pegado, F., Comerlato, E., Ventura, F., Jobert, A., Nakamura, K., Buiatti, M., … Dehaene, S. (2014). Timing the impact of literacy on visual processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(49), E5233–E5242.

Pegado, F., Nakamura, K., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Pallier, C., ... Dehaene, S. (2014). Literacy breaks mirror invariance for visual stimuli: A behavioral study with adult illiterates. *Journal of Experimental Psychology General*, *143*(2), 887–894.

Pegado, F., Nakamura, K., Cohen, L., & Dehaene, S. (2011). Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the visual word form area. *NeuroImage, 55*(2), 742–749.

Perea, M., Moret-Tatay, C., & Panadero, V. (2011). Suppression of mirror generalization for reversible letters: Evidence from masked priming. *Journal of Memory and Language*, *65*(3), 237–246.

Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2015). Developmental dyslexia. *Annual Review of Clinical Psychology*, *11*(1), 283–307.

Portex, M., Hélin, C., Ponce, C., & Foulin, J. N. (2018). Dynamics of mirror writing compared to conventional writing in typical preliterate children. *Reading and Writing*, *31*, 1435–1448.

Priftis, K., Rusconi, E., Umiltà, C., & Zorzi, M. (2003). Pure agnosia for mirror stimuli after right inferior parietal lesion. *Brain*, *126*(4), 908–919.

Rajalingham, R., Kar, K., Sanghavi, S., Dehaene, S., & DiCarlo, J. J. (2020). The inferior temporal cortex is a potential cortical precursor of orthographic processing in untrained monkeys. *Nature Communication*, *11*, 3886. doi.org/10.1038/s41467-020-17714-3

Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H. (2011). Meta-analyzing brain dysfunctions in dyslexic children and adults. *NeuroImage, 56*(3), 1735–1742.

Rodman, H. R., Scalaidhe, S. P., & Gross, C. G. (1993). Response properties of neurons in temporal cortical visual areas of infant monkeys. *Journal of Neurophysiology*, *70*(3), 1115–1136.

Rollenhagen, J. E. & Olson, C. R. (2000). Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex. *Science*, *287*(5457), 1506–1508.

Schott, G. D. (2007). Mirror writing: Neurological reflections on an unusual phenomenon. *Journal of Neurology*, *Neurosurgy, & Psychiatry*, *78*(1), 5–13. doi: 10.1136/jnnp.2006.094870

Siok, W. T., Niu, Z. D., Jin, Z., Perfetti, C. A., & Tan, L. H. (2009). A structural-functional basis for dyslexia in the cortex of Chinese readers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(14), 5561–5566.

van der Mark, S., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., Buckelmuller, J., ... Brandeis, D. (2009). Children with dyslexia lack multiple specializations along the visual word form (VWF) system. *NeuroImage*, *47*(4), 1940–1949.

van der Mark, S., Klaver, P., Bucher, K., Maurer, U., Schulz, E., Brem, S., ... Brandeis, D. (2011). The left occipitotemporal system in reading: disruption of focal fMRI connectivity to left inferior frontal and inferior parietal language areas in children with dyslexia. *NeuroImage*, *54*(3), 2426–2436.

Mirror equivalence or invariance and its breaking: Evidence from behavioral to cognitive neural mechanism

QI Xingliang[1], CAI Houde[2]

([1] *College of Preschool Education, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing* 211171, *China*)

([2] *School of Psychology, Nanjing Normal University, Nanjing* 210097, *China*)

Abstract: Mirror equivalence or invariance is an adaptive processing of animal and human individuals on the bilateral symmetry of natural objects, but it could also hinder learning to read the script containing mirror-image characters. It is necessary for readers to learn to use the inhibitory mechanism on mirror generalization, so as to break the mirror equivalence or invariance and acquire the ability to identify the mirror characters. In this process, the left fusiform gyrus cortex gradually develops into VWFA capable of recognizing mirror characters by interacting with the early visual cortex, the parietal cortex and the brain network of spoken language. Future research needs to focus on some important issues, such as the role of two hemispheres and commissural fibers on the mirror equivalence or invariance processing, the detailed processing mechanism of mirror generalization and inhibition and its influence on mirror writing, and the mirror generalization processing of Chinese characters in normal Chinese children.

Key words: mirror equivalence or invariance and its breaking, left fusiform gyrus, visual word form area (VWFA), “unlearning” mechanism, mirror generalization and inhibition